

Об ограничении интегральных аэрозольных распределений в обратных задачах солнечной фотометрии

В.В. Веретенников, С.С. Меньщикова*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 31.03.2011 г.

Рассмотрены два способа оценки суммарного геометрического сечения частиц аэрозоля из спектральных измерений аэрозольной оптической толщины (АОТ). Результаты предназначены для доопределения обратных задач солнечной фотометрии с использованием интегральных распределений при описании дисперсного состава аэрозольных частиц. Первый способ основан на использовании установленной функциональной связи между искомым геометрическим сечением и его верхней границей, которая задается априорно. Во втором способе привлекается информация о спектральном поведении среднего фактора эффективности ослабления на множестве микрофизических моделей аэрозоля. Численно исследовано влияние границ распределений на точность восстановления микроструктурных параметров аэрозоля при обращении АОТ.

Ключевые слова: микроструктура аэрозоля, аэрозольная оптическая толщина, обратные задачи; aerosol microstructure, aerosol optical depth, inverse problem.

Введение

Информационные возможности солнечной фотометрии, используемой для наблюдений за оптическим состоянием атмосферы, существенно увеличиваются за счет привлечения математических методов интерпретации измерений. Такой подход успешно реализован в сети солнечных фотометров AERONET [1]. В Сибирском регионе развернута сеть солнечных фотометров типа SP [2, 3], разработанных в ИОА СО РАН, которые позволяют определять аэрозольную оптическую толщину (АОТ) в широком спектральном диапазоне.

Обработка данных сетевых фотометров SP осуществляется с помощью информационной системы [4], которая включает в себя модуль, предназначенный для определения микроструктурных параметров аэрозоля из спектральных измерений АОТ на основе специально разработанного алгоритма решения обратной задачи [5]. Это позволяет значительно расширить круг доступных для решения задач физики атмосферы, атмосферной радиации, климата, экологии и охраны окружающей среды [6–8].

Особенность алгоритма обращения заключается в том, что для описания дисперсного состава аэрозоля используется интегральная функция распределения $S(r)$, которая характеризует суммарное геометрическое сечение частиц, радиус которых больше или равен r . Эта функция является положительной монотонно невозрастающей и ограниченной сверху. Отмеченные условия обеспечивают устойчивость

восстановления функции $S(r)$ из измерений АОТ. Платой за это является необходимость в априорном задании суммарного геометрического сечения аэрозольных частиц $S_0 = S(0)$. Теоретически достаточно знать любую оценку $C \geq S_0$ сверху. Однако на практике эффективность решения обратной задачи в значительной степени зависит от корректного задания границы C , которая может изменяться в широких пределах и, вообще говоря, также является неизвестной величиной.

В настоящей статье детально исследован вопрос о влиянии границ интегральных распределений на точность восстановления микроструктурных параметров аэрозоля. Предложены практические способы оценки полного геометрического сечения аэрозоля в обратных задачах солнечной спектрофотометрии.

1. Краткое описание алгоритма решения обратной задачи

Дисперсный состав аэрозольных частиц, которые содержатся в вертикальном столбе атмосферы единичной площади, можно характеризовать интегральной функцией распределения $S(r)$, определяющей суммарное геометрическое сечение частиц радиусом, большим или равным r . Распределение $S(r)$ принадлежит множеству неотрицательных монотонно невозрастающих функций, непрерывных слева. Значение функции в нуле $S(0) = S_0$ определяет полное геометрическое сечение всех аэрозольных частиц в столбе воздуха.

В работе [5] показано, что распределение $S(r)$ удовлетворяет интегральному уравнению первого рода, дискретная форма которого имеет следующий вид:

* Виктор Васильевич Веретенников (vuv@iao.ru); Светлана Сергеевна Меньщикова (mss.@iao.ru).

$$\sum_{j=1}^n Q_j(\lambda) S_j = \tau(\lambda), \quad (1)$$

где $S_j = S(r_j)$ – значения искомой функции в узлах r_j , $j = 1, \dots, n$; $\tau(\lambda)$ – зависимость АОТ от длины волны λ . Коэффициенты $Q_j(\lambda)$ в уравнении (1) находятся по формулам

$$Q_j(\lambda) = \bar{K}_j(\lambda) - \bar{K}_{j-1}(\lambda), \quad (2)$$

где

$$\bar{K}_j(\lambda) = \frac{1}{r_{j+1} - r_j} \int_{r_j}^{r_{j+1}} K(\lambda, r) dr, \quad (3)$$

$$j = 1, \dots, n; \bar{K}_0(\lambda) = 0.$$

Функции $\bar{K}_j(\lambda)$ (3), $j \neq 0$, являются средними значениями фактора эффективности ослабления $K(\lambda, r)$ на интервале $[r_j, r_{j+1}]$. Вектор решения S принадлежит ограниченному замкнутому выпуклому многограннику M_n в R^n :

$$M_n = \{S : S \in R^n, C \geq S_1 \geq S_2 \geq \dots \geq S_n \geq 0\}. \quad (4)$$

Величина C в (4) определяет верхнюю границу суммарного сечения аэрозольных частиц S и должна быть задана исходя из априорных знаний о величине полного геометрического сечения частиц. Обратная задача по восстановлению вектора S из уравнения (1) для дискретного набора спектральных измерений АОТ $\tau_i = \tau(\lambda_i)$, $\lambda_i \in \Lambda$, $i = 1, \dots, m$, сводится к минимизации на множестве векторов $S \in M_n$ (4) функционала невязки

$$F^2 = \|QS - \tau\|^2. \quad (5)$$

В качестве приближенного решения обратной задачи может быть выбран любой вектор $S \in M_n$, для которого значение функционала невязки не превышает уровня погрешности входных данных. В указанной постановке обеспечивается устойчивость решения обратной задачи [9]. По восстановленному распределению $S(r)$, помимо суммарного геометрического сечения частиц $S = S(0)$, легко находятся различные другие параметры микроструктуры.

2. Влияние верхней границы распределения на результаты обращения

При практической реализации алгоритмов минимизации функционала невязки (5) важную роль играет адекватность априорного выбора верхней границы C в ограничениях (4) реальной атмосферной ситуации. Представленные ниже данные численных экспериментов, выполненных для широкого круга микроструктурных моделей, свидетельствуют о существенном влиянии границы C на результаты восстановления аэрозольных распределений $S(r)$.

Модельные аэрозольные распределения, использованные в расчетах, соответствовали среде, образо-

ванной двумя фракциями частиц, субмикронной (m) и грубодисперсной (r) при различном соотношении между ними. В качестве модели m -фракции рассматривалась дымка H [10], а дисперсный состав r -фракции был задан в виде широкого логнормального распределения. Соотношение между фракциями регулировалось величиной параметра p , который определял в АОТ $\tau(\lambda)$ относительный вклад, вносимый частицами r -фракции (см. подробности в [11]) на заданной длине волны $\lambda = 0,55$ мкм. В частности, случай $p = 0$ соответствует ослаблению света только субмикронным аэрозолем.

Так же как и суммарное сечение S , граница C на практике неизвестна и может меняться в широких пределах. Для решения обратной задачи существенным является положение границы C по отношению к точному сечению S_0 . Поэтому за меру близости указанных величин примем их отношение

$$\gamma = C/S_0. \quad (6)$$

На рис. 1 представлены интегральные распределения $S(r)$, восстановленные в отсутствие частиц r -фракции (а) и при их наличии (б) для ряда значений отношения γ .

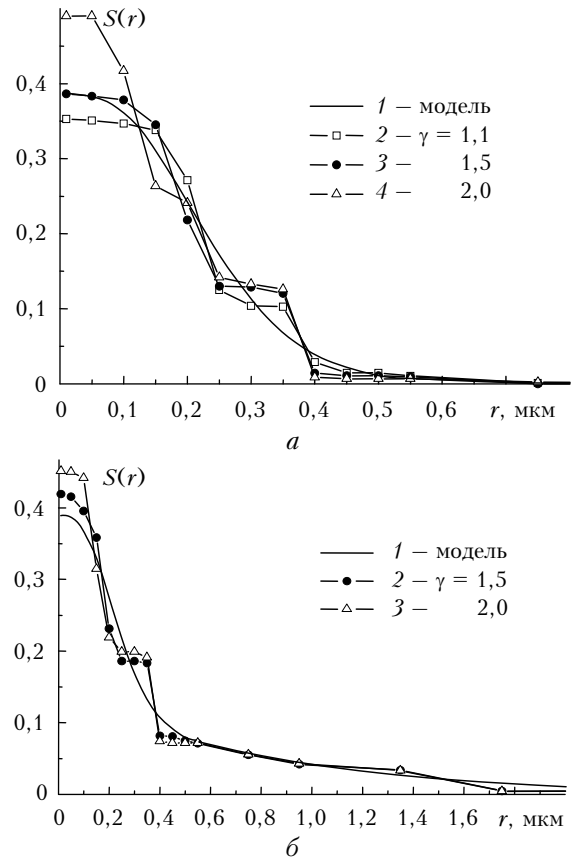


Рис. 1. Интегральные функции распределения геометрического сечения частиц по размерам, восстановленные в численном эксперименте при различном выборе отношения $\gamma = C/S_0$ верхней границы аэрозольных распределений C к суммарному сечению S_0 для модели субмикронного аэрозоля (а) и при добавлении частиц грубодисперсной фракции (б)

Из рис. 1 видно, что вид восстановленных распределений зависит от выбора γ (а следовательно, границы C). В наибольшей степени эта зависимость проявляется в области $r < 0,15$ мкм и отражается на точности восстановления суммарного геометрического сечения $S = S(r = 0)$.

Остановимся подробнее на анализе суммарного сечения $S(\gamma)$ как функции γ , представленного на рис. 2 для различных значений p . По аналогии с (6) эта зависимость приведена в виде безразмерного отношения

$$\rho(\gamma) = S(\gamma)/S_0. \quad (7)$$

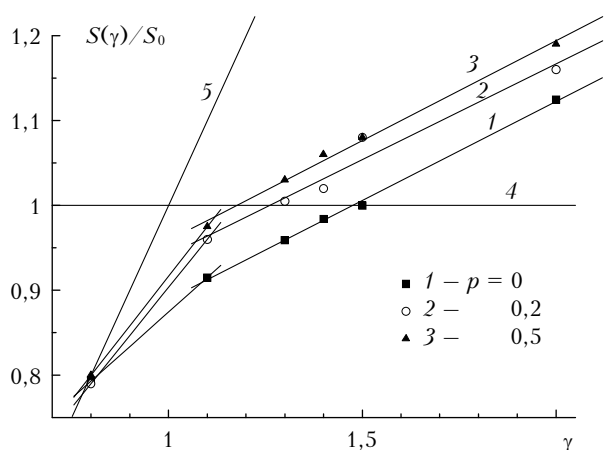


Рис. 2. Зависимость восстановленного геометрического сечения частиц $S(\gamma)$ от отношения $\gamma = C/S_0$ при вариациях вклада p грубодисперсной фракции частиц в АОТ $\tau(0,55)$

Рассмотрение относительных характеристик γ (6) и ρ (7) делает полученные результаты инвариантными к вариациям сечения S_0 . Как видно из рис. 2, поведение отношения $\rho(\gamma)$ имеет монотонно возрастающий характер и при $0,8 < \gamma < 2$ может быть аппроксимировано кусочно-линейными функциями. В рассматриваемом диапазоне изменения γ погрешность восстановления сечения достигает 20%.

Для сравнения заметим, что в случае корректно поставленной задачи решение при ограничениях вида (4) не должно зависеть от C при $C \geq S_0$ и будет совпадать с точным решением в отсутствие ошибки во входных данных. В результате функция $\rho(\gamma)$ при $\gamma \geq 1$ будет иметь постоянное значение $\rho(\gamma) = 1$ (см. рис. 2, прямая 4). Если ограничивающая константа $C < S_0$, то точное решение задачи найти невозможно, а для приближенного решения кривая $\rho(\gamma)$ будет располагаться ниже прямой $\rho = \gamma$ (см. рис. 2, прямая 5).

В случае обсуждаемой нами некорректно поставленной задачи поведение функции $\rho(\gamma)$ заметно меняется. Если при $\gamma < 1$ кривая $\rho(\gamma)$ имеет такой же наклон ($\rho \sim \gamma$), как и в случае корректно поставленной задачи, то по мере приближения к точке $\gamma = 1$ ее наклон уменьшается. В результате при выборе точного значения S_0 в качестве верхней границы C восстановленное сечение $S(\gamma = 1)$ уже не достигнет уровня S_0 , составляя от него 87–92% в зависимости от

дисперсного состава аэрозоля. Можно утверждать даже большее, а именно: неравенство $S(C) < S_0$ сохранит знак в некоторой окрестности $C > S_0$.

Положение оптимального значения γ^* , при котором $S(\gamma^*) = S_0$, также зависит от микроструктуры аэрозоля и для рассматриваемых распределений заключено в интервале $1,23 < \gamma < 1,5$. Внутри указанного интервала отклонение восстановленного сечения $S(\lambda)$ от точного значения может изменяться от –5,3 до 7,8% и не превышает по абсолютной величине 3,6% в точке $\gamma = 1,32$. Важное практическое следствие полученных результатов заключается в том, что априорно выбираемое значение верхней границы C должно быть больше, чем точное сечение S_0 , в среднем в 1,3 раза.

Следует отметить, что для всех восстановленных распределений невязка решения остается достаточно низкой (меньше 0,5%), что фактически свидетельствует об оптической неразличимости аэрозольных распределений, представленных на рис. 1.

Полезно также рассмотреть влияние выбора границы C на величину других восстанавливаемых микроструктурных параметров, таких как объемный фактор заполнения $V = (4/3) \int_0^R S(r) dr$ и средний

радиус частиц $r_s = 0,75V/S$. Численные оценки, выполненные для модели субмикронного аэрозоля ($p = 0$), показывают, что с увеличением γ (границы C) объемный фактор V также монотонно растет. На интервале $1,1 < \gamma < 2$ функция $V = V(\gamma)$ изменяется в достаточно узкой области $0,123 < V < 0,135$, включающей точное значение $V_0 = 0,124$. В отличие от функции $V = V(\gamma)$, средний радиус восстановленных распределений $r_s = r_s(\gamma)$ в рассматриваемой области $1,1 < \gamma < 2$ монотонно убывает от 0,262 до 0,206 мкм. Интересно отметить, что минимальное расхождение между точным средним радиусом $r_{s0} = 0,241$ мкм и его восстановленным значением $r_s(\gamma)$ наблюдается в окрестности точки $\gamma = 1,5$ вблизи минимума ошибки восстановления сечения $S(\gamma)$.

Параметры микроструктуры аэрозоля, восстановленные в численном эксперименте при различном отношении $\gamma = C/S_0$

Параметр	Модель	$\gamma = 1,1$	$\gamma = 1,5$	$\gamma = 2,0$	
S		0,390	0,376	0,419	0,451
V , см ³ /м ²		0,227	0,223	0,223	0,227
$V^{(s)}$, см ³ /м ²		0,102	0,099	0,106	0,109
$V^{(v)}$, см ³ /м ²		0,125	0,124	0,119	0,118
r_s , мкм		0,437	0,444	0,401	0,377
$r_s^{(s)}$, мкм		0,241	0,246	0,228	0,215
$r_s^{(v)}$, мкм		1,29	1,24	1,24	1,23

Для примера в таблице представлены микроструктурные параметры для модели среды, содержащей субмикронную и грубодисперсную фракции частиц ($p = 0,2$), которые восстановлены как для полного ансамбля частиц, так и с разделением на фракции.

Тенденции, выявленные ранее для чисто субмикронного аэрозоля, здесь сохраняются для полного

ансамбля частиц. Наименее чувствительными к выбору граничного значения C являются параметры, определяющие объемную концентрацию аэрозоля, и, в первую очередь, объемный фактор заполнения V для всего ансамбля. При сравнении характеристик по фракциям наименее чувствительными к выбору C оказываются микроструктурные параметры грубодисперсной фракции. Это обусловлено тем, что вариации γ в наибольшей степени оказывают влияние на восстановление дисперсного состава самых мелких частиц радиусом $r < 0,15$ мкм (см. рис. 1).

3. Применение критерия отношения для оценки границы распределения

При априорном выборе границы C естественно исходить из критерия, чтобы восстановленное суммарное сечение приближалось к точному, $S(C) \rightarrow S_0$. Это эквивалентно условию $\rho(\gamma) = 1$, которое определяет оптимальное значение γ^* . Результаты численных экспериментов на множестве микроструктурных моделей, представленные в разд. 2, позволили оценить значение $\gamma^* \approx 1,3$, при котором отклонение $S(C)$ от S_0 не превышает 3,6%. Положение оптимального значения границы $C^* = \gamma^* S_0$ в этом случае находится по отношению к точному сечению S_0 , которое само подлежит определению.

Чтобы исключить из равенств (6) и (7) величину S_0 , разделим одно из них на другое. Это приводит к следующей функции:

$$\chi(\gamma) = \gamma/\rho(\gamma), \quad (8)$$

которая всегда может быть определена при решении обратной задачи, поскольку

$$\gamma/\rho(\gamma) = C/S(C) = \chi(C). \quad (9)$$

Для рассматриваемой модельной задачи поведение отношения $\chi = \chi(\gamma)$ (8) как функции $\gamma = C/S_0$ представлено на рис. 3. Приведенные на рис. 3 кривые отличаются от зависимостей $\chi = \chi(C)$ только другой нормировкой масштаба по оси абсцисс.

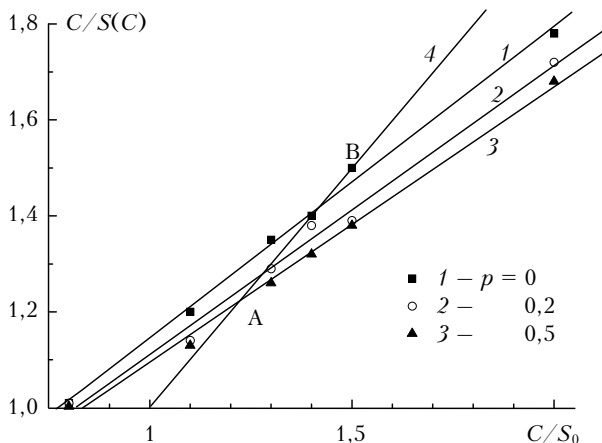


Рис. 3. Функции $C/S(C)$ в зависимости от верхней границы C для различных аэрозольных моделей

Заметим, что для корректно поставленной задачи зависимость $\chi = \chi(C)$ при $C \geq S_0$ имела бы вид прямой C/S_0 с наклоном, пропорциональным $1/S_0$, который обращается в единицу при переходе к функции $\chi(\gamma)$ (рис. 3, прямая 4).

Отметим особенности поведения функции $\chi(\gamma)$. Так же как и функция $S(\gamma)$, зависимость $\chi(\gamma)$ монотонно возрастающая. Очевидно, что функция $\chi(\gamma) > 1$ при любых значениях γ . Далее, как следует из формулы (8), $\chi(\gamma^*) = \gamma^*$. Заметим также, что из отмеченных свойств следует уменьшение наклона кривой $\chi(\gamma)$ относительно прямой $\chi = \gamma$. На рис. 3 прямая 4 $\chi = \gamma$ пересекается с параметрическим семейством зависимостей $\chi(\gamma)$ в крайних точках А и В. Координаты указанных точек соответствуют значениям γ^* на границах интервала $1,23 < \gamma < 1,5$, который на рис. 2 определяет область изменения γ , где для различных микроструктурных моделей выполняется условие $S(\gamma) = S_0$.

Указанные свойства позволяют предложить следующий способ определения границы C . На первом этапе из экспериментальных данных определяется зависимость отношения $\chi(C)$ от выбранной границы C . Если теперь построить обратную функцию $C = C(\chi)$, то искомое значение C найдем как значение обратной функции при $\chi = \gamma^*$, где γ^* выбирается исходя из модельных оценок. Значение C можно определить также без построения обратной функции, непосредственно решая уравнение $\chi(C) = \gamma^*$ численными методами. При этом в связи с необходимостью минимизации функционала невязки F^2 (5) на множествах M_n (4) с различными значениями верхней границы C трудоемкость решения обратной задачи возрастает.

4. Использование среднего фактора эффективности ослабления для определения суммарного геометрического сечения

Полезно сравнить возможности рассмотренного критерия отношения с другими способами оценки суммарного сечения частиц S и его верхней границы C . Один из возможных подходов связан с выражением геометрического сечения частиц через отношение измеряемой АОТ $\tau(\lambda)$ к среднему фактору эффективности ослабления для одной и той же длины волны. В отличие от геометрического сечения частиц S , величина среднего фактора эффективности ослабления $\bar{K}(\lambda) = \tau(\lambda)/S_0$ изменяется в гораздо более узких пределах и может быть оценена численно на основе модельных представлений о микроструктуре аэрозоля.

Пусть $\bar{K}_{\min}(\lambda)$, $\bar{K}_{\max}(\lambda)$ — нижняя и верхняя границы области изменения среднего фактора эффективности на множестве допустимых микрофизических моделей. Тогда в качестве верхней границы множества значений, которые может принимать геометрическое сечение частиц, следует взять отношение

$$S_{\max} = \tau(\lambda)/\bar{K}_{\min}(\lambda), \quad (10)$$

которое является функцией длины волны λ .

На рис. 4, а представлены результаты модельных расчетов спектральных зависимостей $\bar{K}(\lambda)$ при различном соотношении между субмикронной и грубодисперсной фракциями частиц, которое определяется параметром p .

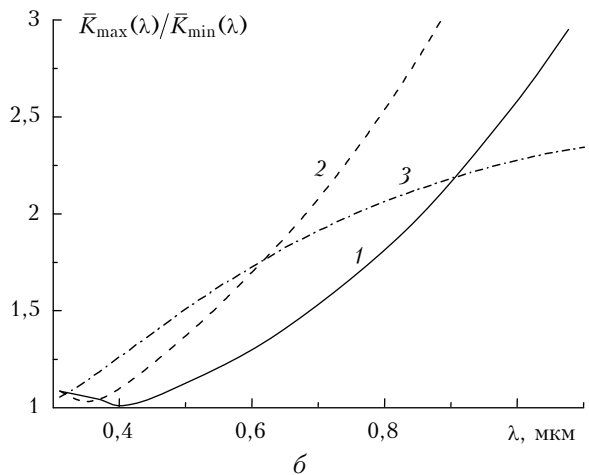
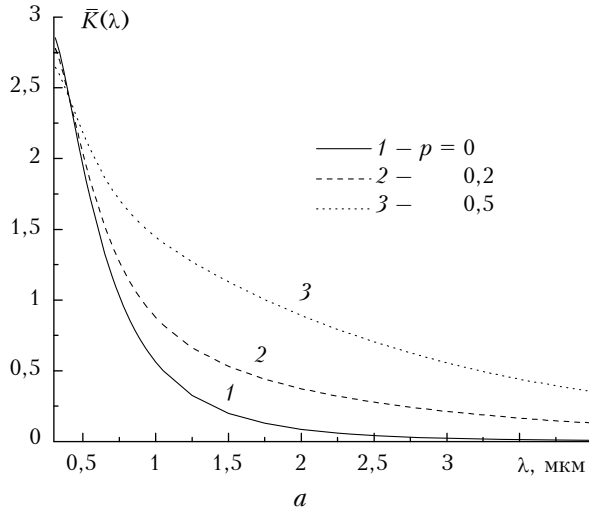


Рис. 4. Спектральные зависимости среднего фактора эффективности ослабления $\bar{K}(\lambda)$ при изменении относительного вклада p частиц грубодисперсной фракции в АОТ $\tau(0,55)$: кривая 1 — $p = 0$; 2 — $p = 0,2$; 3 — $p = 0,5$ (а) и поведение спектральных зависимостей $\bar{K}_{\max}(\lambda)/\bar{K}_{\min}(\lambda)$ на множестве микрофизических моделей аэрозоля: кривая 1 — $0 \leq p \leq 0,5$; $m = 1,35 - i \cdot 0$; 2 — $\bar{K}_{\max}(\lambda, m = 1,55 - i \cdot 0)/\bar{K}_{\min}(\lambda, m = 1,35 - i \cdot 0; p = 0,5)$; 3 — $p = 0$; $\bar{K}_{\max}(\lambda, m = 1,55 - i \cdot 0)/\bar{K}_{\min}(\lambda, m = 1,35 - i \cdot 0)$ (б)

В рассматриваемом примере комплексный показатель преломления m для обеих фракций предполагался одинаковым и равным $1,35 - i \cdot 0$. С увеличением вещественной части показателя преломления n происходит систематическое смещение кривых на рис. 4, а в положительном направлении оси ординат. Отмеченный эффект легко объясняется в рамках приближения Хюлста [12], согласно которому зависимость фактора эффективности ослабления $K(\lambda, r)$

от показателя преломления выражается через обобщенный параметр $\rho = 2kr(n - 1)$.

Из рис. 4, а видно, что на множестве модельных микроструктурных распределений минимальное значение $\bar{K}_{\min}(\lambda)$ достигается при $p = 0$, т.е. в отсутствие грубодисперсной фракции частиц, практически во всем спектральном диапазоне, за исключением узкой области на его левом конце.

Естественно поставить вопрос о взаимном соотношении между точным сечением S_0 и верхней границей S_{\max} (10). Рассматривая в качестве меры их близости, по аналогии с разд. 2, отношение $\varphi = S_{\max}/S_0$, нетрудно показать, что

$$\varphi(\lambda) = \bar{K}(\lambda)/\bar{K}_{\min}(\lambda), \quad \gamma \geq 1. \quad (11)$$

При вариациях микрофизических свойств аэрозоля отношение $\varphi(\lambda)$ будет принимать значения из некоторого промежутка $[1, \varphi_{\max}(\lambda)]$, длина которого

$$\varphi_{\max}(\lambda) - 1 = \frac{\bar{K}_{\max}(\lambda) - \bar{K}_{\min}(\lambda)}{\bar{K}_{\min}(\lambda)} \quad (12)$$

характеризует степень неопределенности положения верхней границы S_{\max} (10) относительно сечения S_0 и может быть оценена априорно с помощью численного моделирования. Очевидно, что при использовании формулы (10) для уменьшения указанной неопределенности следует выбирать спектральный диапазон, в котором $\varphi_{\max}(\lambda) \rightarrow 1$.

Все кривые, изображенные на рис. 4, а, пересекаются в окрестности точки $\lambda = 0,41$ мкм. Из этого следует, что в указанном диапазоне выбор микроструктурной модели оказывает слабое влияние на изменчивость среднего фактора $\bar{K}(\lambda)$, а отношение $\varphi(\lambda)$ близко к единице. Это подтверждают результаты расчета отношения $\varphi_{\max}(\lambda) = \bar{K}_{\max}(\lambda)/\bar{K}_{\min}(\lambda)$, представленные на рис. 4, б. Зависимостям среднего фактора $\bar{K}(\lambda)$, приведенным на рис. 4, а, соответствует кривая 1 на рис. 4, б.

Кривая 1 определяет локальный максимум отношения $\varphi(\lambda)$ по параметру p при $0 \leq p \leq 0,5$ и фиксированном значении $n = 1,35$. Дальнейший рост $\varphi(\lambda)$ при неизменном $p = 0,5$ связан с увеличением вещественной части показателя преломления до $n = 1,55$ (кривая 2). Наконец, положение кривой 3 соответствует условиям, при которых в окрестности длины волны $\lambda = 0,41$ мкм достигается глобальный максимум функции $\varphi(\lambda)$ по параметрам p и n .

С учетом возможных вариаций вещественной и мнимой частей показателя преломления в пределах $1,35 \leq n \leq 1,55$ и $0 \leq k \leq 0,05$ оценка $\varphi(\lambda)$ (11) для $\lambda = 0,41$ мкм не превышает значения 1,35.

Величина S_{\max} (10) может быть выбрана в качестве возможной верхней границы S в неравенствах (4) при решении обратной задачи, поскольку удовлетворяет требованию $S_{\max} > S_0$. При таком выборе S отношение $\gamma = S/S_0$ заключено в интервале $[1, \varphi_{\max}]$, где для рассмотренного множества микрофизических моделей получено $\varphi_{\max} = 1,35$. Как следует из результатов расчетов, представленных на рис. 2, в указанном диапазоне изменения γ отклонение восстановленного сечения $S(\gamma)$ от точного

значения может изменяться от -13 до 4% . Результат можно улучшить, если положить $C = qS_{\max}$, $q > 1$. В частности, при $q = 1,1$ это обеспечивает уменьшение ошибки восстановления $S(\gamma)$ до 8% , что является вполне удовлетворительным для многих практических потребностей.

Заключение

Подводя итоги, можно выделить следующие основные результаты. Для широкого набора моделей аэрозоля нами численно исследовано влияние выбора границы распределений по размерам на точность восстановления микроструктурных параметров при обращении спектральных измерений АОТ. В результате обнаружено, что между искомым суммарным геометрическим сечением частиц и его верхней границей, задаваемой априорно, можно установить оптимальное соотношение. Это свойство предложено использовать при решении обратной задачи для оценки границы аэрозольных распределений по критерию отношения.

Определены условия, при которых ошибка восстановления суммарного сечения не превышает $3,6\%$ на множестве рассмотренных аэрозольных моделей. Показано, что наиболее чувствительными к выбору верхней границы являются микроструктурные параметры частиц субмикронной фракции. Наибольшая устойчивость наблюдается при восстановлении объемной концентрации аэрозоля.

Рассмотрен метод оценки суммарного сечения частиц на основе априорной информации о поведении среднего фактора эффективности ослабления, который хотя и уступает по точности критерию отношения, однако несравненно проще в применении. Кроме того, метод позволяет получить хорошее начальное приближение для последующего применения критерия отношения.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП (Госконтракт № 14.740.11.0204).

1. Dubovik O., Smirnov A., Holben B.N., King M.D., Kaufman Y.J., Eck T.F., Slutsker I. Accuracy assessment of

aerosol optical properties retrieved from AERONET sun and sky radiance measurements // J. Geophys. Res. D. 2000. V. 105, N 8. P. 9791–9806.

2. Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Турчинович С.А. Солнечный фотометр для научного мониторинга (аппаратура, методики, алгоритмы) // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14, № 12. С. 1162–1169.
3. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Ростов А.П., Турчинович С.А., Турчинович Ю.С. Система сетевого мониторинга радиационно-активных компонентов атмосферы. Часть I. Солнечные фотометры // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17, № 4. С. 354–360.
4. Кабанов Д.М., Веретенников В.В., Воронина Ю.В., Сакерин С.М., Турчинович Ю.С. Информационная система для сетевых солнечных фотометров // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 1. С. 61–67.
5. Веретенников В.В. Обратные задачи солнечной фотометрии для интегральных аэрозольных распределений. I. Теория и численный эксперимент в субмикронной области размеров частиц // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 4, С. 294–300.
6. Макиенко Э.В., Кабанов Д.М., Рахимов Р.Ф., Сакерин С.М. Изменения микроструктуры аэрозоля под воздействием дымов по результатам обращения данных спектральных оптических измерений // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 4. С. 321–327.
7. Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Веретенников В.В. Средний дневной ход характеристик аэрозоля в летних условиях в районе г. Томска // Оптика атмосф. и океана. Физ. атмосф.: Мат-лы XVI Междунар. симпоз. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2009. С. 334–337.
8. Сакерин С.М., Веретенников В.В., Журавлева Т.Б., Кабанов Д.М., Насртдинов И.М. Сравнительный анализ радиационных характеристик аэрозоля в ситуациях дымов лесных пожаров и обычных условиях // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 451–461.
9. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М.: Наука, 1983. 200 с.
10. Дэйрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 165 с.
11. Веретенников В.В. Обратные задачи солнечной фотометрии для интегральных аэрозольных распределений. II. Разделение на субмикронную и грубодисперсную фракции // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 4. С. 301–307.
12. Хюлст Г. ван де. Рассеяние света малыми частицами. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961. 536 с.

V.V. Veretennikov, S.S. Men'shchikova. Limitation of integral aerosol distributions in inverse problems of solar photometry.

We consider two methods of estimating the total aerosol particle cross section from spectral measurements of the aerosol optical depth (AOD). These methods are intended for supplementary definition of the solar photometry inverse problems for description of aerosol particle dispersed composition with application of integral particle size distributions. The first method is based on the established functional relationship between the unknown geometrical cross section and its upper boundary set *a priori*. In the second method, information is invoked on the spectral behavior of the extinction efficiency factor calculated for a set of aerosol microphysical models. We investigate numerically the influence of the upper boundary of the integral aerosol distributions on the accuracy of reconstructing the microstructure aerosol parameters retrieved by AOD inversion.